

## Mesin listrik berputar - Bagian 17: Petunjuk pemakaian motor induksi rotor sangkar yang disuplai dari konverter



## PENDAHULUAN

Standar Nasional Indonesia mengenai “Mesin Listrik Berputar, Bagian 17: Petunjuk pemakaian motor induksi sangkar yang disulang dari konverter”, diadopsi dari International Electrotechnical Commission (IEC) Publikasi 34-17 (1992) dengan judul “*Rotating electrical machines – Part 17: Cage induction motors wher fed from converters – Application guide*”, yang dirumuskan oleh Panitia Teknik Mesin Listrik Berputar (PTMS) masa kerja 1998/1999.

Keanggotaan Panitia Teknik tersebut ditetapkan dengan Keputusan Menteri Pertambangan dan Energi Nomor: 50-12/40/600.3/1998 tanggal 21 Agustus 1998, sebagai:

Ketua Harian : Ir. J. Soekarto  
Wakil Ketua : Ir. Ishak Sastranegara  
Sekertaris I : Ir. Zairinal Zainuddin  
Sekertaris II : Ir. B.H. Pasaribu

Ketika dalam taraf Rancangan Standar Nasional Indonesia (RSNI) ini telah melalui prosesprosedur perumusan standar dan terakhir dibahas dalam Forum Konsensus XIII pada tanggal 18 sampai dengan 24 Februari 1999 untuk mencapai mufakat.

Selanjutnya diajukan kepada Badan Standardisasi Nasional pada tahun 1998 dan mendapat nomor SNI 04-

Dalam rangka mempertahankan mutu dan ketersediaan standar yang tetap mengikuti perkembangan, maka diharapkan masyarakat standardisasi ketenagalistrikan memberikan saran dan usul perbaikan demi kesempurnaan rancangan ini dan tak kalah pentingnya untuk revisi standar ini dikemudian hari.

Semoga SNI ini bermanfaat bagi kita terutama dalam menunjang pembangunan Nasional untuk mensejahterakan masyarakat.

**DIREKTUR JENDERAL LISTRIK DAN PENGEMBANGAN ENERGI**



## **Mesin Listrik Berputar**

### **Bagian 17 : Petunjuk pemakaian motor induksi sangkar yang disulang dari konverter**

#### **1 Ruang lingkup**

Standar ini memuat operasi motor induksi sangkar dalam keadaan ajek yang terdapat dalam IEC 34-1-, jika disulang dari konverter. Standar ini memuat operasi di atas julat seting kecepatan, tetapi diluar fenomena pengasutan atau transien.

Standar ini hanya konverter jenis tidak langsung. Jenis ini terdiri dari konverter yang diperkuat (diimpose) arus searah di dalam sirkuit tengahnya (I-Konverter) dan konverter yang dipengaruhi tegangan a.s (U-Konverter), baik jenis blok atau jenis yang dikendalikan oleh suatu pulsa, tanpa membatasi jumlah pulsa, lebar pulsa atau rasio pengulangan pulsa. Untuk keperluan standar ini, konverter dapat memuat transistor, thyristor atau thyristor-GTO seperti semikonduktor daya, dengan analog atau elektronika kendali digital.

#### **2 Dokumen acuan**

IEC 34-1 : 1983, Mesin Listrik Berputar - Bagian 1 : Pengenal dan unjuk kerja

IEC 34-6 : 1991, Mesin Listrik Berputar - Bagian 6 : Metode Pendinginan (Kode IC)

IEC 34-12 : 1980, Mesin Listrik Berputar - Bagian 12 : Kinerja asutan motor sangkar induksi fase-tiga kecepatan-tunggal untuk tegangan sampai dengan 660 V

IEC 72, Seri dimensi dan keluaran untuk mesin listrik berputar

#### **3 Karakteristik motor**

Arus keluaran dari suatu I-konverter mengalir melalui belitan stator motor selama periode komutasi. Sehingga pengetahuan tentang sirkuit pengganti motor perlu untuk desain sirkuit komutasi.

Dalam hal U-konverter pengetahuan sirkuit pengganti motor umumnya tidak perlu untuk desain sirkuit komutasi, tetapi impedans harmonik motor sangat mempengaruhi rugi-rugi yang disebabkan harmonik.

Persyaratan tersebut diatas diperlukan untuk kehandalan operasi dari motor penggerak. Jika diperlukan hal-hal yang rinci mengenai torsi tambahan dan rugi-rugi yang terjadi selama operasi konverter (dalam torsi osilasi khusus)<sup>4</sup> maka perlu pengetahuan parameter sirkuit pengganti motor untuk keseluruhan spektrum harmonik.



Ringkasan pengganti motor yang umum tidak dapat ditentukan disebabkan adanya berbagai macam desain dari motor induksi rotor sangkar dengan karakteristik desain N (digunakan rotor tembaga batang terbenam dan aluminium sangkar ganda) dan juga disebabkan oleh lebar jalur frekuensi harmonik (lebar frekuensi dari 300 Hz-2000 Hz). Sesuai aturan tidak diperbolehkan menggunakan besaran-besaran sirkuit pengganti untuk operasi ajek pada frekuensi sistem (misalnya induktans bocor berputar normal) untuk menghitung torsi dan rugi-rugi, Pabrikan motor dapat memberi nilai untuk sirkuit pengganti hanya jika diketahui spektrum frekuensi dari arus dan tegangan.

#### **4 Spektrum frekuensi tegangan dan/atau arus**

Jika ditinjau dari segi penurunan torsi dan torsi osilasi yang ditimbulkan oleh harmonik maka perlu mengetahui harmonik relatif yang terkandung pada tegangan dan/atau arus dibandingkan dengan operasi menggunakan tegangan sinusoidal.

Gambar 1. Menunjukkan contoh karakteristik arus fase motor terhadap waktu jika disuplai oleh konverter-I. Harmonik tingkat  $n = 5; 7; 11; 12; 13$  adalah penting dalam praktek. Kandungan harmonik relatif tergantung hanya pada periode komutasi yang harganya berbeda untuk penggerak yang berbeda dan dapat dinyatakan dengan satu nilai tertentu  $HVF = \sqrt{\sum (u_n^2/N)}$  menurut SNI 04.1933 – 1990. Akan tetapi prosedur tersebut tidak memberikan keuntungan untuk torsi HVF yang diperlukan, rasio penurunan torsi sebesar 1-3 tergantung dari penggunaan motor tersebut. Motor yang tercakup dalam SNI 04.3860.1995 mempunyai desain bagian aktif yang berbeda dengan demikian masing-masing dengan cara berbeda.

Dalam hal konverter - U, berbagai pola pulsa digunakan pada konverter - U (mungkin bervariasi sepanjang julat seting frekuensi). Tidaklah mungkin menyatakan secara umum tentang keadaan harmonik relatif. Gambar 2 menunjukkan contoh karakteristik tegangan fase motor terhadap waktu untuk operasi ini. Untuk kepastiannya (definite) perlu diketahui spektrum harmonik dari tegangan keluaran konverter dan reaksinya pada motor tersebut diteliti. Frekuensi yang muncul terletak pada julat harmonik  $n = 5; 7; 11; 13$  dan juga pada harmonik yang merupakan kelipatan frekuensi pulsa. Jika ditinjau dari sudut pengaruh harmonik, modulasi akan menjadi semakin bagus dengan semakin teredamnya harmonik tingkat rendah.

#### **5 Rugi-rugi tambahan**

Tegangan dan arus harmonik di dalam motor induksi rotor sangkar disuplai dari konverter meningkatkan rugi-rugi besi dan rugi-rugi belitan di dalam stator dan rotor. Peningkatan rugi-rugi besi tergantung pada amplitudo dan terutama karena frekuensi dari harmonik tegangan fase. Rugi-rugi ini mungkin penting dalam hal motor yang disuplai dari U-konverter, tetapi dapat diabaikan jika disuplai dari I-konverter.

Jenis lain dari rugi-rugi besi, yaitu rugi-rugi komutasi, terjadi pada operasi dari I-konverter. Perubahan cepat dari arah fluks bocor selama periode komutasi mengakibatkan arus Eddy dalam gigi stator dan rotor. Tidak ada rugi-rugi komutasi dalam hal operasi dari U-konverter karena arus komutasi tidak mengalir melalui belitan motor.



Beberapa konverter didesain menurut garis-putus dalam Gambar 4. Fluks dasar pada frekuensi pengenalan lebih rendah dari pada menggunakan suplai sinusoidal. Suplai yang menggunakan konverter tersebut, mengakibatkan pengurangan torsi yang lebih besar pada frekuensi pengenalan motor.

Dalam julat seting kecepatan putar, kecepatan sinkron cenderung turun  $U_1/f = \text{konstan}$  yang mempengaruhi torsi keluaran, jika resistans belitan stator diabaikan terhadap reaktans motor. Untuk mengkompensasi pengaruh resistans stator motor, beberapa konverter didesain agar dengan karakteristik sesuai garis putus dalam Gambar 4. Pada kecepatan rendah torsi tinggi terjadi jika kompensasi yang dimaksud tidak ada.

Di atas tegangan tertentu (dalam gambar 4 di atas tegangan pengenalan) tegangan keluaran konverter adalah konstan seperti kenaikan frekuensi (julatan melemahnya medan).

Hubungan antara tegangan dan frekuensi berubah sedemikian rupa dalam julat seting frekuensi sehingga, faktor derasi akan berubah.

Gambar 5 memperlihatkan contoh kurva derasi untuk motor tipikal yang disuplai oleh I-konverter. Kurva konverter-U dibuat dengan bentuk yang sama. Contoh kurva dapat diberikan oleh pabrikan motor jika spektrum harmonik dan karakteristik tegangan frekuensi konverter diketahui. Berikut ini untuk pendinginan khusus (IC 01 atau IC 0141) dan metode ventilasi (pendinginan sirkulasi-sendiri atau pendinginan bebas) tidak dimungkinkan untuk membuat kurva yang dapat digunakan untuk semua kasus tetapi, secara umum, motor yang disuplai dari konverter pulsa-kontrol (frekuensi pulsa dalam julat kHz) disuplai dari konverter blok. Bila frekuensi pulsa dinaikkan, derasinya berkurang.

## 7 Torsi Osilasi

Torsi tidak serempak (waktu-konstan) yang dibangkitkan oleh harmonik berpengaruh sedikit selama operasi. Namun, hal ini tidak berlaku untuk torsi osilasi yang menyebabkan vibrasi pada sistem mekanik.

Motor induksi fase-tiga yang disuplai dari I-konverter dalam hubungan enam pulsa torsi osilasi (torsi osilasi secara elektromagnet yang dibangkitkan dalam celah udara) dengan 6 kali dan 12 kali frekuensi operasi ( $f_1$ ) adalah penting, amplitudo torsi dalam tahapan 15 % (frekuensi  $6 f_1$ ) dan 5 % (frekuensi  $12 f_1$ ) dari torsi pengenalan. Disarankan perhitungan frekuensi torsi alami, khususnya untuk menggerakkan elemen transmisi yang hanya teredam sedikit.

Dalam hal mengendalikan konverter dengan pulsa-dikontrol, torsi osilasi pada frekuensi rendah (tingkat  $3 f_1$ ) dapat lebih tinggi dibandingkan mengendalikan konverter-I. Frekuensi torsi osilasi dominan ditentukan oleh frekuensi pulsa, amplitudo juga tergantung pada lebar pulsa. Untuk itu amplitudo torsi osilasi dapat bervariasi di atas julat lebar pulsa (kurang dari 10 % di atas 50 % dari torsi julat).

Dalam hal frekuensi pulsa tinggi (tingkat  $21 f_1$ ) torsi osilasi frekuensi  $6 f_1$  dan  $12 f_1$  selalu kurang dari 10 % dari torsi pengenalan. Sebagai tambahan, torsi osilasi dengan amplitudo yang lebih tinggi terjadi pada frekuensi yang mendekati dua kali frekuensi pulsa; namun, osilasi torsi ini secara praktek tidak mempengaruhi sistem pengendalian.



## 8 Bising yang diperkuat secara magnetik

Mekanisme eksitasi untuk bising magnetik karena harmonik menjadi lebih kompleks dibandingkan dengan operasi dari suatu sumber sinusoidal. Pada saat ini tidak mungkin melakukan perhitungan pendahuluan yang memadai terhadap bising magnetik yang terjadi selama konverter beroperasi pada motor induksi rotor sangkar. Khususnya, karena resonansi dapat terjadi pada beberapa titik dalam julat kecepatan putar.

Menurut pengalaman suatu kenaikan pada tingkat kebisingan bobot A [A-weighter], sebesar 1 dB sampai 6 dB terjadi untuk pengoperasian I-konverter pada frekuensi pengenalan, dan sebesar 5 dB sampai 15 dB untuk pengoperasian U-konverter bila dibandingkan pengoperasian dari suatu sumber tegangan sinusoidal.

## 9 Umur sistem isolasi

Sistem isolasi motor mengalami “stress” dielektrik yang lebih tinggi dibandingkan dengan suplai tegangan dan arus sinusoidal. Dalam hal suplai dari I-konverter, puncak tegangan motor terjadi selama periode komutasi yang menyebabkan isolasi utama mengalami stress.

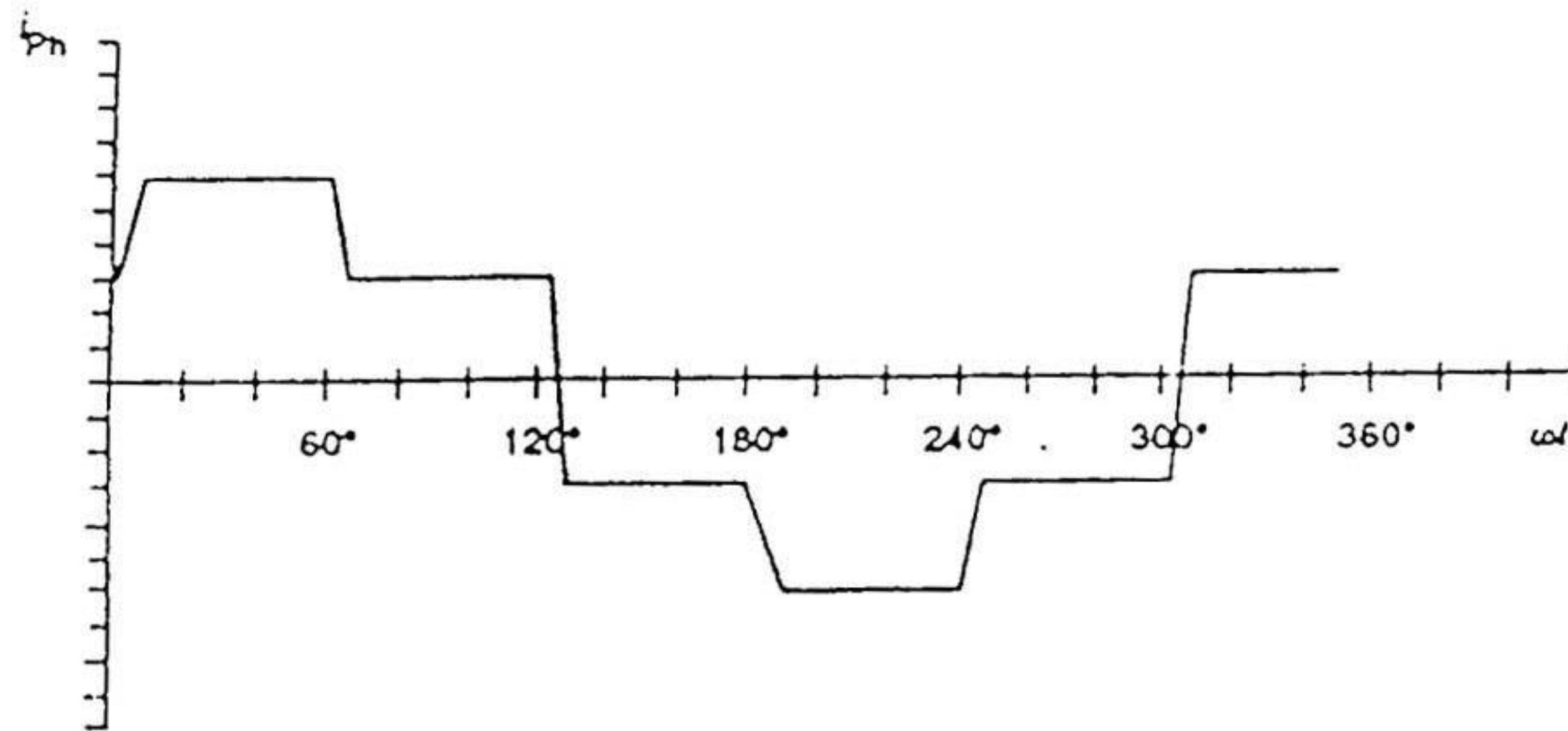
Disuplai konverter-U gradien tegangan yang menyebabkan “stress” pada isolasi antar lilitan “interturn” terutama pada jalur kumparan, merupakan yang penting.

Belum ada pengalaman praktis mengenai besarnya pengaruh tersebut di atas terhadap umur sistem isolasi. Namun dapat diasumsikan bahwa tidak ada penurunan umur yang berarti pada pengoperasian konverter bila nilai batas berikut diperhatikan.

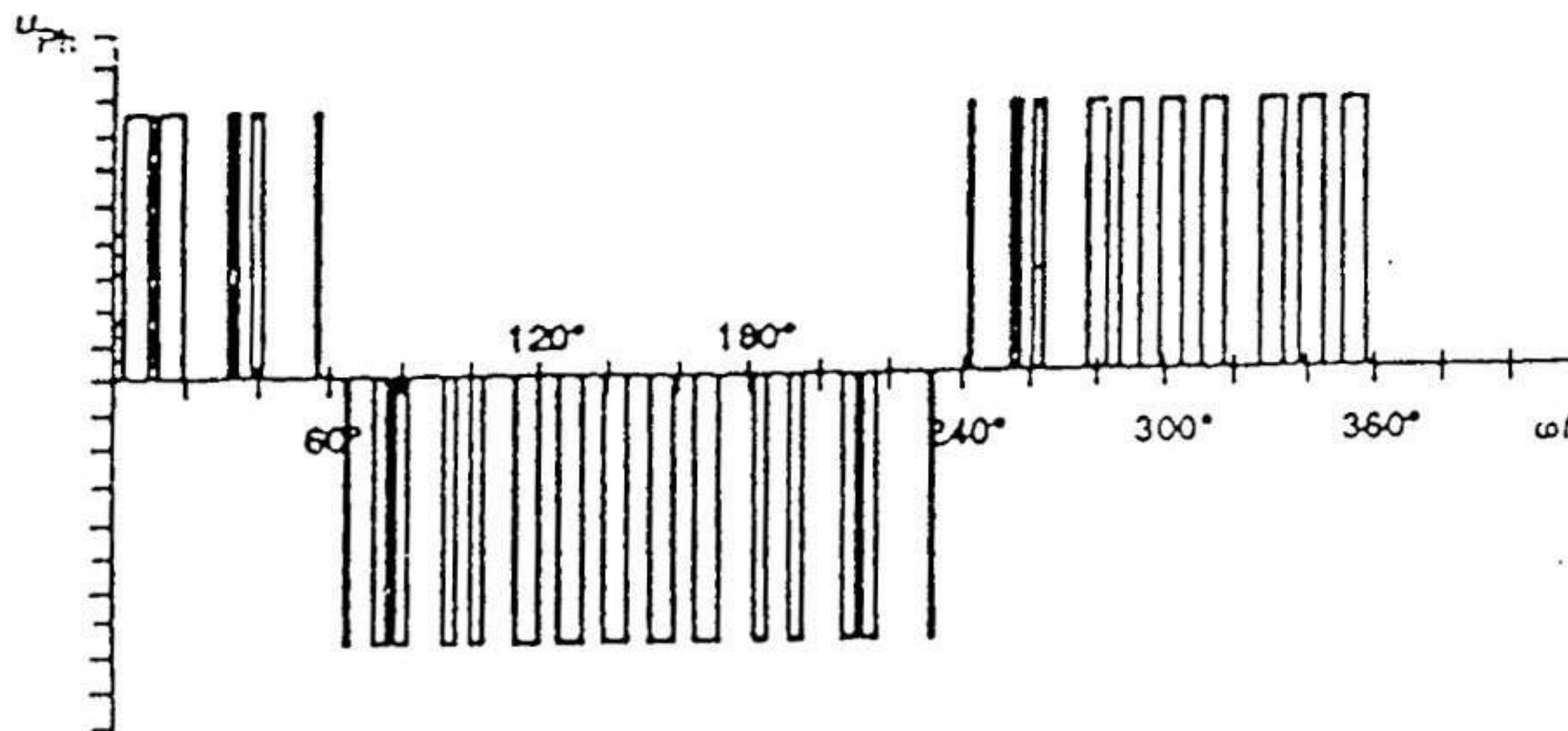
- a)  $U_{\text{puncak}} < 1\,000\text{ V}$
- b)  $du/dt < 500\text{ V}/\mu\text{s}$

## 10 Tegangan poros

Tegangan tambahan yang terjadi pada poros disebabkan oleh tegangan dan arus puncak yang ditambahkan pada besaran fase simetris selama operasi/kerja konverter. Menurut pengalaman tegangan pada poros lebih besar dari kira-kira 500 mV (puncak) memerlukan isolasi bantalan anti gesekan. Motor dalam ruang lingkup IEC 34-12 jarang dipasang dengan isolasi bantalan, sehingga disarankan untuk mengukur tegangan poros selama operasi konverter.

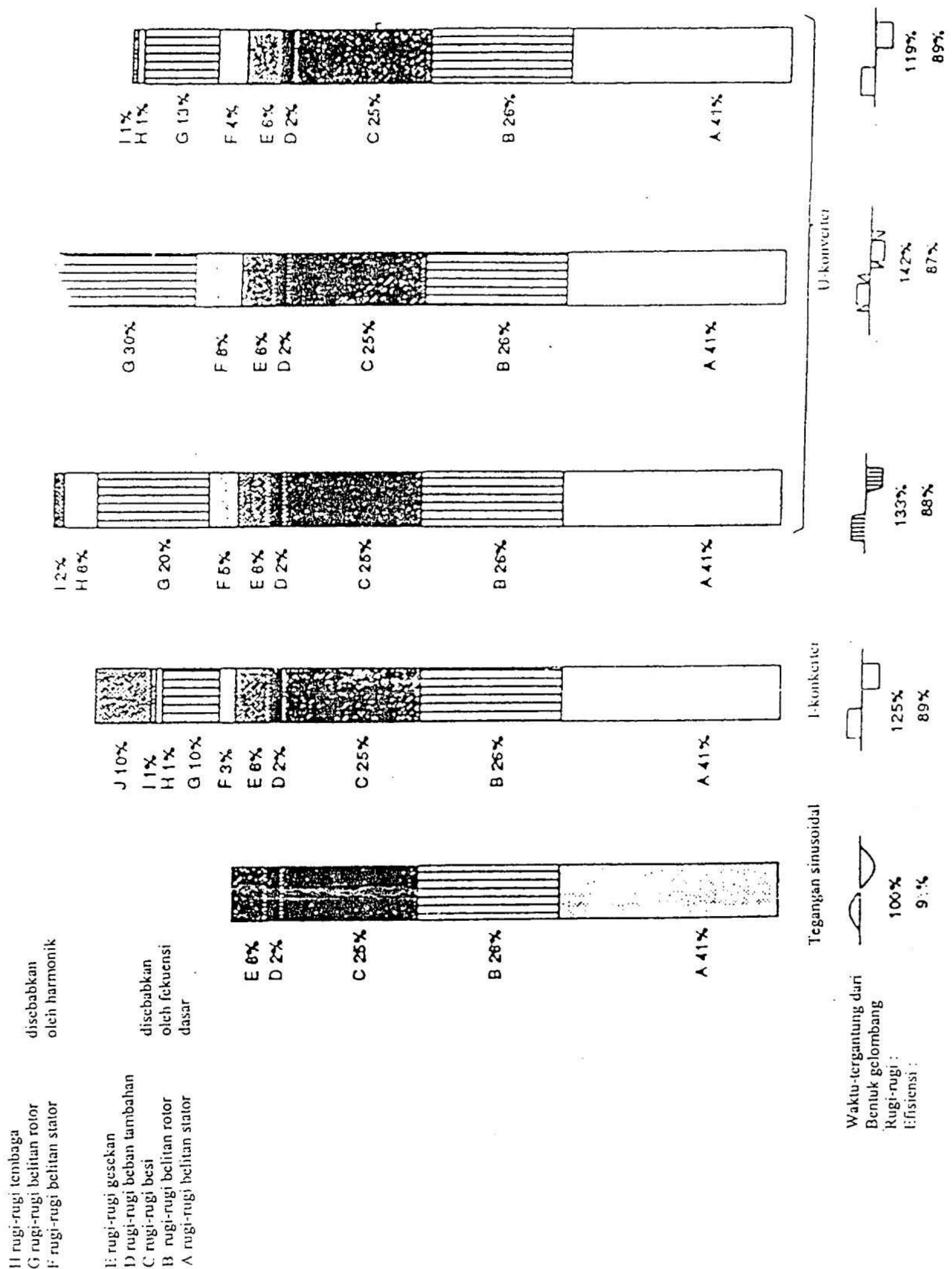


Gambar 1 - Karakteristik waktu pada arus fase motor  $i_{\text{fase}}$  dalam hubungan delta yang disuplai oleh I-konverter (Contoh).



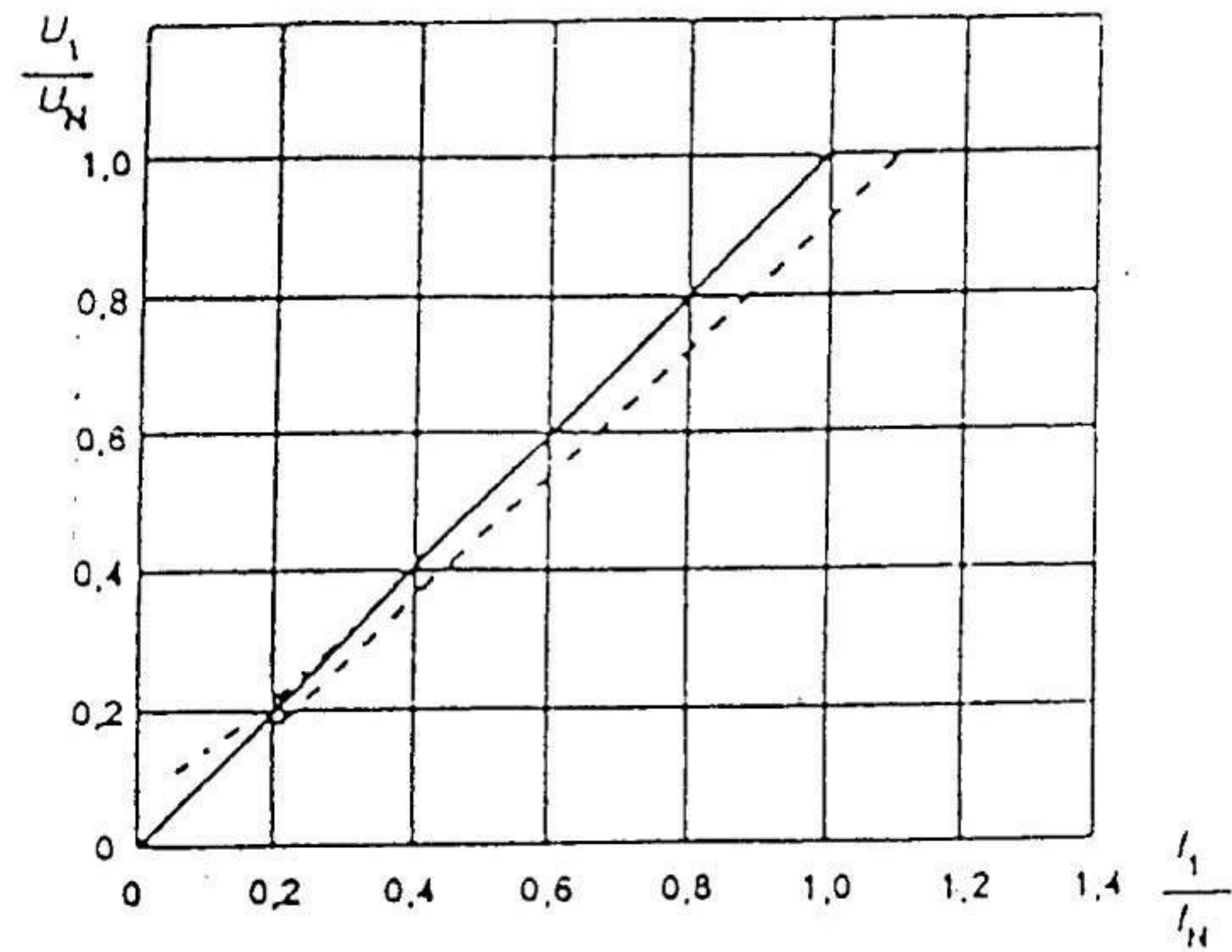
Gambar 2 - Karakteristik waktu tegangan fase motor  $U_{\text{fase}}$  dalam hubungan delta yang disuplai U-konverter dengan konverter kontrol dengan frekuensi pulsa  $f = 750 \text{ Hz}$  (mendekati sinusoidal) dan dengan frekuensi  $f_1 = 50 \text{ Hz}$ .



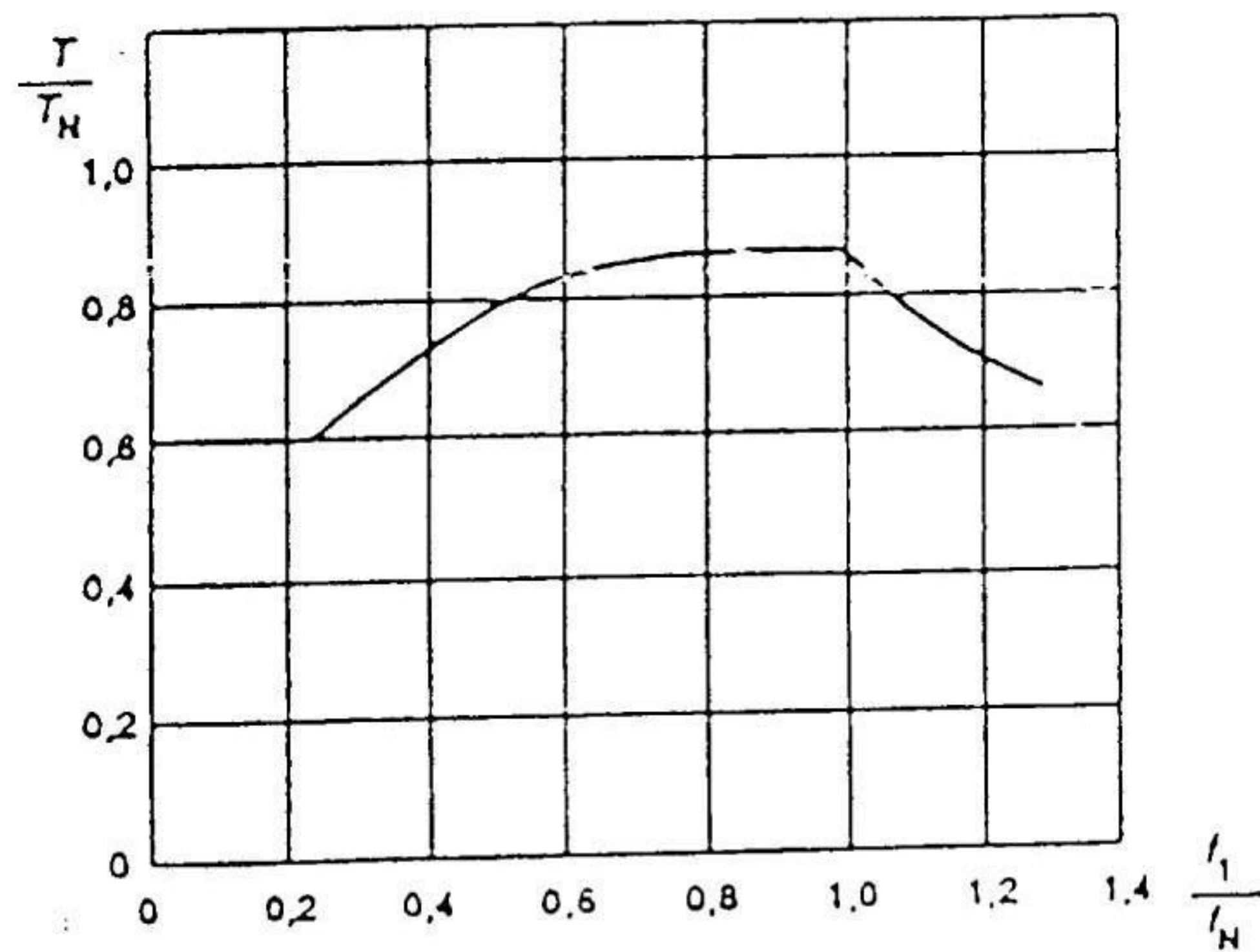


Gambar 3 - Pengaruh suplai konverter pada rugi-rugi motor induksi rotor sangkar induksi (ukuran rangka 160 L,  $2p = 4$ , desain karakteristik N) yang dioperasikan dengan torsi dan kecepatan pengenal.





Gambar 4 - Tegangan dasar  $U_1$  sebagai fungsi dari frekuensi operasi  $f_1$  (penjelasan dari jejak kurva dalam ayat 4)



Gambar 5 - Faktor derasi untuk torsi motor induksi rotor sangkar desain karakteristik N, IC0141 (pendinginan sirkulasi sendiri) yang disuplai dari I-konverter sebagai fungsi dari frekuensi operasi  $f_1$  (contoh)





**BADAN STANDARDISASI NASIONAL - BSN**  
Gedung Manggala Wanabakti Blok IV Lt. 3-4  
Jl. Jend. Gatot Subroto, Senayan Jakarta 10270  
Telp: 021- 574 7043; Faks: 021- 5747045; e-mail : [bsn@bsn.go.id](mailto:bsn@bsn.go.id)